شبیه‌سازی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال غیرنیوتنی محلول آبی کربوکسی متیل سلولز-اکسید آلومینیوم در یک میکرولوله در رژیم لغزشی*

سید علی سجادی فر[۱]		آرش کریمی‌پور[۲]		داوود طغرایی[۳]

چکیده *در تحقیق حاضر جریان و انتقال حرارت نانوسیال غیرنیوتنی محلول آبی‌کربوکسی متیل سلولز- اکسید آلومینیوم با کسرحجمی‌های مختلف نانوذرات در یک میکرولولهٔ دوبعدی شبیه‌سازی می‌شود. شرایط مرزی سرعت لغزشی و پرش دمایی روی دیوارهٔ میکرولوله نیز درنظر گرفته می‌شود. اعتبار داده‌های حاصل در مقایسه با داده‌های محققان پیشین مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل به‌صورت خطوط هم‌دما، عدد ناسلت، پروفیل‌های دما و سرعت در مقاطع مختلف میکرولوله ارائه می‌گردد. مشاهده می‌شود که عدد ناسلت با افزایش ضریب لغزش و درصد حجمی نانو ذرات جامد افزایش می‌یابد و نرخ این افزایش در مقادیر بالای عدد رینولدز بیشتر است.*

واژه‌های کلیدی نانوسیال غیرنیوتنی; میکرولوله; سرعت لغزشی; پرش دمایی.

Simulation of the Forced Convection Heat Transfer Non-Newtonian Nanofluid, Aqueous Solution of Carboxymethyl Cellulose-Aluminum Oxide, in Slip Flow Regime Through a Microtube

S.A. Sajadifar		A. Karimipour		D. Toghraie

Abstract *At present study the flow and heat transfer of Non-Newtonian nanofluid, aqueous solution of carboxymethyl cellulose-Aluminum oxide with different volume fractions of nano particles in a two dimensional microtube is simulated for the first time. Slip velocity and temperature jump boundary conditions are also considered along the microtube walls. The achieved results accuracy is investigated by comparison with those of previous data. The results are presented as isothermal contours, Nusselt number and the profiles of temperature and velocity at different cross sections of the microtube. It is observed that Nusselt number increases with slip velocity coefficient and volume fraction of nano particles; while its rate is more sensitive at higher values of Reynolds number.*

Key Words Non-Newtonian nanofluid; Micro tube; Slip velocity; Temperature jump.

*تاریخ دریافت مقاله ۹٤/٤/١٧ و تاریخ پذیرش آن ٩٤/٧/٢٠ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v28i1.48222

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.
arashkarimipour@gmail.com

(۳) استادیار مهندسی مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران.

مقدمه

انتقال حرارت نقش بسیار مهمی درکاربری‌های متعدد و گوناگون ایفا می‌کند و با پیشرفت صنعت یکی از نیازهای اساسی در صنایع و کارهای تحقیقاتی، استفاده از روش‌های جدید انتقال حرارت با بازده حرارتی بالا می‌باشد. به‌عنوان مثال در فرآیندهای صنعتی مانند سرمایش و گرمایش منابع حرارتی و فرآیندهای تولیدی اعم از پاستوریزاسیون مواد غذایی و صنایع خودروسازی، داروسازی و حمل‌ونقل و سیستم‌های میکروالکترومکانیک و نانوالکترومکانیک نقش بسزایی دارند. در سال‌های اخیر این جریان در ابعاد کوچک بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تلاش‌های زیادی برای کوچک کردن ابعاد دستگاه‌ها و افزایش راندمان آنها انجام شده است.

از آن‌جایی که در اکثر این کاربردها انتقال حرارت درون برخی تجهیزات تبادل حرارت مانند مبدل‌ها، چگالنده‌ها و مخازن گرمایی صورت می‌گیرد، با افزایش بازده حرارتی، فضای اشغال‌شده توسط این وسایل نیز کاهش می‌یابد. این موضوع در کاربردهایی است که به فضای کوچک‌تر و تراکم بیشتر نیاز دارند، مهم است. تغییر خواص ترموفیزیکی سیال عامل، تغییر شرایط مرزی و نوع هندسهٔ جریان روش‌های مختلف برای بازدهی حرارتی می‌باشد. با پیشرفت صنعت و با کوچک‌تر شدن دستگاه‌های الکترونیکی، تحقیقات در زمینهٔ جریان سیال و انتقال حرارت در مقیاس میکرو توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است که در بسیاری از کاربردهای مهندسی و پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدون شک پیشرفت‌های اخیر را در تولیدات ذرات نانو می‌توان یک تحول در روش‌های افزایش انتقال حرارت دانست زیرا اندازهٔ کوچک ذرات و کسر حجمی پایین مورد استفاده مسائلی نظیر کلوخه شدن و افت فشار را حل می‌کند. علاوه بر این سطح نسبی بزرگ ذرات نانو، پایداری ذرات را افزایش می‌دهد و مسئلهٔ ته‌نشینی را کاهش می‌دهد و هزینه‌های لازم برای نگهداری و انتقال سیالات را کم می‌کند. هم‌چنین به‌صورت نظری مشخص است هرچه ذرات ریزتر باشند، سطح نسبی انتقال حرارت آنها بیشتر می‌شود و درنتیجه بازدهی‌حرارتی ذرات معلق که تابعی از سطوح انتقال حرارت می‌باشد با کاهش اندازهٔ ذرات افزایش می‌یابد. در سیالات غیرنیوتنی برخلاف سیالات نیوتنی رابطهٔ تنش برشی با نرخ برش خطی نیست و مدل‌های مختلفی برای بیان رفتار آنها وجود دارند که یکی از متداول‌ترین آنها، مدل پاورلا می‌باشد.

مروری برپژوهش‌های پیشین

تحقیقات متعددی رفتار جریان و انتقال حرارت را در کانال‌ها و میکروکانال‌ها در سطح مقطع‌های مختلف بررسی کرده‌اند. بخش عمده‌ای از این تحقیقات به بررسی تأثیر پارامترهایی چون عدد رینولدز، شکل سطح مقطع کانال و مشخصات هندسی پرداخته‌اند [1-5]. میکرو جریان‌ها برحسب میزان عددی نادسن $(Kn = \frac{\lambda}{D_H})$ طبقه‌بندی می‌شوند. D_H قطر هیدرولیکی (طول مشخصه) و λ فاصله پویش آزاد متوسط ملکولی است [6]. بررسی آزمایشگاهی خواص حرکتی و حرارتی جریان، منجر به ارائهٔ حدود مشخصی برای رژیم‌های مختلف جریان برحسب عدد نادسن شده است [7]. به‌ازای $Kn < 0.001$ سیال پیوسته است و معادلات ناویر–استوکس صادق می‌باشد. اما برای $Kn > 10$، $0.1 < Kn < 10$ و یا $0.001 < Kn < 0.1$ حرکت سیال به‌ترتیب به‌عنوان یک جریان آزاد مولکولی، گذرا و لغزشی در نظر گرفته می‌شود. معمولاً از جریان و انتقال حرارت سیال در رژیم‌های لغزشی به‌عنوان یک میکروجریان لغزشی نیز یاد می‌گردد [8-9]. کشاورز و همکارانش [10] انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در نانوسیال غیرنیوتنی تک‌فازی در

یک لولهٔ افقی تحت شار حرارتی ثابت به روش عددی را مورد بررسی قراردادند. آنها بیان کردند که با استفاده از تغییراتی در غلظت و قطر نانو سیال می‌توان انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش داد. آنها به بررسی اثر عدد رینولدز در میزان انتقال حرارت پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش عدد رینولدز و پرانتل می‌تواند باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و درنتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت شود. هم‌چنین یک معادله برای عدد ناسلت به‌وسیلهٔ اعداد بی‌بعد به‌دست آورده شده است. چوی و همکارانش [11] به بررسی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم و جریان آرام در یک لوله با خم ۹۰ درجه پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که با افزایش عدد رینولدز و پرانتل، عدد ناسلت میانگین افزایش پیدا می‌کند و هم‌چنین عدد ناسلت میانگین در خم لوله ببیشتر از نواحی ورودی و خروجی لوله می‌باشد و عدد ناسلت میانگین تابعی از عدد پرانتل می‌باشد. تهیر و همکاران [12] به بررسی عددی جابه‌جایی اجباری در یک جریان آرام توسعه‌یافتهٔ نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک لولهٔ دایروی با شار حرارتی ثابت پرداختند و اثر قطر ذرات، عدد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات برروی ضریب انتقال حرارت میانگین را بررسی کردند و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی به‌طور خطی افزایش می‌یابد و با افزایش اندازهٔ ذرات به‌طور غیر خطی کاهش می‌یابد. اکبری‌نیا و همکاران [13] مطالعهٔ عددی روی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی جریان آرام نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم در یک لولهٔ دایره‌ای شکل را انجام دادند. آنها از مدل مخلوط دوفازی استفاده کردند و تأثیر قطر ذرات نانو را روی رفتارهای حرارتی و حرکتی نانوسیال بررسی کردند. آنها نشان دادند که برای یک کسرحجمی مشخص، با افزایش قطر ذرات نانویی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک پوسته‌ای کاهش می‌یابد. حجت و همکاران [14] به بررسی جابه‌جایی اجباری نانوسیال غیرنیوتنی در یک میکرولوله با شرایط مرزی دما ثابت پرداخته‌اند که درنتیجه، ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت نانوسیال نسبت به سیال پایه افزایش یافته است و هم‌چنین عدد ناسلت نانوسیال غیرنیوتنی تابعی از عدد رینولدز و عدد پرانـدتل می‌باشد. کومار و همکاران [15] به بررسی عددی نرخ انتقال حرارت جریان ترکیبی یک نانوسیال تک‌فازی آب-اکسیدآلومینیوم داخل یک لوله پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ذرات نانویی به یک سیال پایه نرخ انتقال حرارت و عدد ناسلت میانگین افزایش یافته است. اکبرنیا و همکاران [16] به بررسی جابه‌جایی اجباری نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک میکروکانال مستطیلی دوبعدی همراه با لغزش و عدم لغزش پرداختند و افزایش انتقال حرارت بر اثر افزودن ذرات نانو را به سیال پایه در اعداد رینولدز پایین مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که عدد رینولدز در میکروکانال تحت تأثیر سرعت ورودی و ویسکوزیته سینتیکی نانوسیال است و ویسکوزیته با افزایش کسر حجمی نانو ذرات افزایش می‌یابد. منگ رولکار و همکاران [17] انتقال حرارت نانو سیالات در کانال را مورد بررسی قرار دادند. آن ها بیان کردند که با استفاده از تغییراتی در هندسهٔ جریان، شرایط مرزی و یا افزایش رسانایی حرارتی سیال، می‌توان انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش داد. آنها به بررسی اثر عدد رینولدز، کسر حجمی و اندازه ذرات در میزان انتقال حرارت پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش عدد رینولدز و پرانتل می‌تواند باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و درنتیجه باعث افزایش نرخ انتقال حرارت شود. هم‌چنین نشان دادند که با استفاده

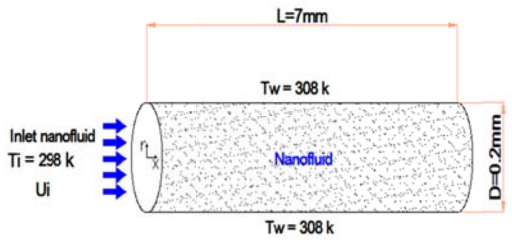
از افزودن ذرات نانو بـه سـیال پایـه مـی‌تـوان ضـریب هدایت حرارتی سیال را افزایش داد. سانترا و همکاران [18] به بررسی عـددی انتقـال حـرارت و جریـان آرام نانوسیال آب–اکسید مـس در میـان دو صـفحهٔ مـوازی هم‌دمـا پرداختـه‌انـد. ایـن تحلیـل در رینولـدز و کسـر حجمی‌های مختلف انجام گرفته اسـت و نتـایج نشـان می‌دهد که عملکرد حرارتی بـا افـزایش کسـر حجمـی افزایش می‌یابد و نانوسیال نیز در مقایسه با آب خالص برای خنک‌سازی مفیـدتر خواهـد بـود. برخـورداری و همکـاران [19] جابـه‌جـایی اجبـاری جریـان لغزشـی نانوسیال غیرنیوتنی در یک میکروکانال را تحت شرایط مرزی دما ثابت و شار ثابت مورد بررسـی قـرار دادنـد. آنها نشان دادند افزایش سـرعت لغزشـی ذرات جامـد، موجـب کـاهش سـرعت در مرکـز لولـه شـده اسـت درحالی‌که عدد ناسلت افزایش یافته است و هـم‌چنـین تأثیر سرعت لغزشی در شرط مرزی شار ثابت بیشتر از شرط مرزی دما ثابت بوده است. بهزاد مهر و همکـاران [20] انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری جریان مغشوش در یک لولهٔ دایره‌ای شکل، بـا نـانو سـیال آب–اکسـید مس را به‌صورت عددی مطالعـه کردنـد. آنهـا در ایـن مطالعه، مدل مخلوط دوفازی را به‌کار بردند. با مقایسـهٔ نتیجه‌های محاسبه‌شده با مقادیر تجربی، نشان دادند که مدل مخلوط دوفازی دقیق‌تر از مدل تـک‌فـازی اسـت. هم‌چنین چرخش محوری جریان و پروفیل‌های سرعت توسعه‌یافته را در عددهـای رینولـدز مختلـف بررسـی کردند. دینـگ و همکـاران [21] بـه مطالعـهٔ جریـان و انتقـال حـرارت جابـه‌جـایی اجبـاری جریـان آرام در نانولوله‌های کربنی با شرط مرزی عدم لغزش پرداختند و قدرت خنک‌کنندگی آب خـالص و نـانوسـیال آب–مس را مـورد بررسـی قـرار دادنـد. هـم‌چنـین اثـرات تغییرات عدد رینولدز، کسر حجمی را نیز مورد مطالعـه قرار دادند. آنها نشان دادند به‌دلیل نسبت هندسی بالای میکرولوله، ضریب انتقـال حـرارت افـزایش مـی‌یابـد. رئیسی و همکاران [22] به مطالعهٔ عـددی جابـه‌جـایی اجباری جریان آرام نانوسـیال در یـک میکروکانـال بـا شرایط مرزی سرعت لغزشی و عدم لغزش پرداختنـد و قدرت خنک‌کنندگی آب خالص و نانوسیال آب–اکسید مس را مـورد بررسـی قـرار دادنـد. هـم‌چنـین اثـرات تغییرات عدد رینولدز،کسر حجمی و ضریب لغزش در انتقال حرارت به فرم جابه‌جایی اجبـاری را نیـز مـورد مطالعـه قـرار دادنـد. رحمـان و همکـاران [23] انتقـال حرارت یک جریان دوبعدی، پایدار و لغزشـی را بـرای دو نانوسیال مختلف در یـک گـوه بـه‌صـورت عـددی انجام داده‌اند. آنها نشان دادند با افزایش ضریب لغـزش عملکـرد حرارتـی افـزایش خواهـد یافـت. احمـد و همکاران [24] به بررسی عددی انتقال حرارت و افـت فشار نانو سیال آب– مس در یک کانال هم‌دما پرداختند و با اسـتفاده از شـبیه‌سـازی عـددی بـه روش تفاضـل محدود اثرات افزایش عدد رینولدز و کسر حجمـی بـر انتقال حرارت را بررسی کردند و نشـان دادنـد کـه بـا افزایش عدد رینولدز و کسـر حجمـی انتقـال حـرارت افزایش می‌یابد درحالی‌که افت فشار اندک خواهد بود. جانـگ و همکـاران [25] جابـه‌جـایی اجبـاری بـرای نانوسـیال آب–اکسـیدآلومینیوم را در یـک میکروکانـال مستطیلی مورد بررسی قرار دادند. آنها اثـرات افـزایش عدد رینولدز و کسـر حجمـی ذرات جامـد بـر میـزان انتقال حرارت را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادنـد که افزایش کسر حجمی باعث افزایش انتقـال حـرارت می‌شود. هم‌چنین عـدد ناسـلت نیـز بـا افـزایش عـدد رینولدز افزایش خواهد یافت. افشـار و همکـاران [26] به حل تحلیلی معادلات ناویر استوکس و انـرژی بـرای جریـان سـیال در یـک میکروکانـال در رژیـم جریـان لغزشی پرداختند. آنهـا پروفیـل‌هـای سـرعت و دمـا را ارزیابی کردند و تأثیر پارامترهای مختلف را روی انتقال

حرارت و پراکندگی ذرات نانو بررسی کردند. نتایج نشان دادند که می‌توان با کنترل اختلاف فشار و موقعیت ورودی ذرات نانو و همچنین توزیع همگن ذرات در جریان، انتقال حرارت را با افزودن ذرات نانو افزایش داد. کلته و همکاران [27] انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری جریان آرام نانوسیال آب–مس در یک میکروکانال هم‌دما را به‌صورت عددی بررسی کردند. آنها نانو سیال را با مدل دوفازی اویلری مدل کردند. معادلات حاکم برای فازها را با استفاده از روش حجم محدود حل کردند. آنها تفاوت بین سرعت و دما بین فازهای مایع و ذرات نانو را بررسی کردند و مشاهده کردند که سرعت و دمای نسبی فازها، خیلی کم و قابل صرف‌نظر است. همچنین نشان دادند که توزیع کسر حجمی ذرات نانو، یکنواخت است و افزایش انتقال حرارت برای مدل دوفازی، در مقایسه با مدل همگن بیشتر است. نایو و همکاران [۲۸] به بررسی انتقال حرارت یک نانوسیال غیرنیوتنی در یک میکرولوله پرداخته‌اند. آنها شرط مرزی سرعت لغزشی را روی دیواره‌های میکرولوله در نظر گرفتند و نشان دادند عدد ناسلت با افزایش ضریب سرعت لغزشی افزایش می‌یابد.

در تحقیق حاضر نیز برای نخستین بار به مطالعهٔ جابه‌جایی اجباری جریان آرام نانوسیال غیرنیوتنی کربوکسی متیل سلولز–اکسیدآلومینیوم در رژیم لغزشی پرداخته شده است. در این مطالعه عملکرد حرارتی نانوسیال تحت تأثیر نیروی برشی، غلظت ذرات نانو، ضریب لغزش بررسی شده است. نتیجه‌های به‌دست آمدهٔ مسئلهٔ مفروض، با استفاده از پروفیل‌های سرعت، دما و مقادیر عدد نوسلت موضعی و متوسط ارائه شده‌اند. نوآوری پژوهش حاضر با کار نایو و همکاران [28]، درنظر گرفتن شرط مرزی پرش دمایی روی دیواره‌های میکرولوله می‌باشد.

بیان مسئله

شکل (۱) هندسهٔ مورد نظر را در تحقیق حاضر که یک میکرولوله است نشان می‌دهد. طول میکرولوله L=7mm و قطر آن D=0.2mm است. طول میکرولوله در مقایسه با قطر آن زیاد است. نانوسیال غیرنیوتنی کربوکسی متیل سلولز– اکسید آلومینیوم با دمای 298k و با سرعت ثابت (Ui) وارد میکرولوله می‌شود و پس از خنک‌سازی دیواره‌های میکرولوله از انتهای آن خارج می‌شود. قطر ذرات نانوسیال اکسید آلومینیوم برابر ۲۵ نانومتر می‌باشد.



شکل ۱ شکل شماتیک میکرولوله

نانوذرات آلومینیوم دارای شکل یکنواخت و کروی هستند و جریان در میکرولوله به‌صورت آرام، غیرنیوتنی و تراکم‌ناپذیر و با شرط مرزی سرعت لغزشی و پرش دمایی در دیواره‌ها تحت دمای دیواره ثابت فرض می‌شود و اثرات تشعشع قابل چشم پوشی است. سیال پایه محلول آبی کربوکسی متیل سلولز با درصد وزنی 0.5% می‌باشد. خواص ترموفیزیکی نانوسیال در دمای 298k درجه کلوین در جدول (۱) نشان داده شده است. در این تحقیق پارامترهای سیالاتی و انتقال حرارت با اعداد رینولدز Re=1، Re=10 و Re=20 و با کسر حجمی 1.5% و 0.5% و سه عدد ضریب لغزش $\beta^*=0.0$، $\beta^*=0.01$ و $\beta^*=0.1$ بررسی می‌شود.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی نانوسیال

	ϕ=0.5%	ϕ=1.5%	
Cpnf(J/kg)	4121	4012	
Knf(W/mk)	0.6262	0.66	
ρnf(kg/m3)	1013.5	1040.5	

هم‌چنین با توجه به غیرنیوتنی بودن سیال پایه مقادیر n وK، یعنی ضریب و اندیس قاعدهٔ توانی در دمای 298k در جدول (۲) نشان داده شده است [29].

جدول ۲ ضریب و اندیس قاعدهٔ توانی در غلظت‌های مورد نظر

	ϕ=0.5%	ϕ=1.5%
n	0.48	0.51
K	0.22	0.24

همان‌طور که مشاهده می‌شود اندیس قاعدهٔ توانی n، برای سیال پایه مورد تحقیق کوچکتر از یک است و بنابراین این سیال غیرنیوتنی از نوع شبه پلاستیک و نازک‌شونده است.

فرمول‌بندی

معادلات حاکم. معادلات بی‌بعد حاکم شامل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی است که برای حالت دائم و آرام و سیال غیرنیوتنی به‌صورت زیر حل می‌شوند.

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial R}=0 \qquad (۱)$$

$$U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial R}=-\frac{\partial P}{\partial X}+\frac{1}{Re_{nf}}\times\left(\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)^{n}+\frac{\partial}{\partial R}\left(\frac{\partial U}{\partial R}\right)\right)^{n} \qquad (۲)$$

$$U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial R}=-\frac{\partial P}{\partial R}+\frac{1}{Re_{nf}}\times\left(\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)^{n}+\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}R\left(\frac{\partial V}{\partial R}\right)\right)^{n}-\frac{V^2}{R} \qquad (۳)$$

$$U\frac{\partial \theta}{\partial X}+V\frac{\partial \theta}{\partial R}=\frac{1}{Re_{nf}\,Pr_{nf}}\times\left(\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)^{n}+\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}R\left(\frac{\partial \theta}{\partial R}\right)\right)^{n} \qquad (٤)$$

در معادلات فوق از پارامترهای بی‌بعد زیر استفاده می‌شود.

$$P=\frac{p}{\rho_{nf}u_i^{2}} \quad V=\frac{v}{u_i} \quad X=\frac{x}{D} \quad \theta=\frac{T-T_i}{T_w-T_i} \quad U=\frac{u}{u_i} \quad R=\frac{r}{D} \qquad (۵)$$

اعداد رینولدز و پرانتل مطابق فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند [30].

$$Re_{nf}=\frac{\rho_{nf}u_i^{2-n}D^{n}}{K} \qquad Pr_{nf}=\frac{C_p\left(\frac{u_i}{D}\right)^{n-1}K}{k_{nf}} \qquad (٦)$$

که در معادلات فوق n و K ضریب و اندیس قاعدهٔ توانی و k_{nf} ضریب هدایت حرارتی و u_i نانوسیال می‌باشد.

از رابطهٔ زیر برای محاسبهٔ چگالی نانوسیال استفاده می‌شود [31].

$$\rho_{nf}=(1-\varphi)\rho_f+\varphi\rho_s \qquad (۷)$$

که ρ_f چگالی سیال پایه و ρ_s چگالی نانوذرات اکسیدآلومینیوم می‌باشد.

از قانون قاعدهٔ توانی برای محاسبهٔ لزجت نانوسیال استفاده می‌شود [32].

$$\eta_{nf} = K\left(\gamma^{\cdot}\right)^{n-1} \qquad (۸)$$

که در آن $\gamma^{\cdot}$ نرخ برش و n و K ضرایب قاعدهٔ توانی هستند.

ضریب پخش حرارتی مؤثر نانوسیال با فرمول زیر محاسبه می‌شود [33].

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{eff}}{\left(\rho C_p\right)_{nf}} \qquad (۹)$$

ظرفیت گرمای ویژهٔ نانوسیال با فرمول زیر محاسبه می‌شود [16].

$$\left(\rho C_p\right)_{nf} = (1-\varphi)\left(\rho C_p\right)_f + \varphi\left(\rho C_p\right)_s \qquad (۱۰)$$

برای محاسبهٔ ضریب هدایت گرمایی مؤثر نانوسیال برای محلول‌هایی که دارای ذرات کروی‌شکل هستند از رابطهٔ چون و همکاران استفاده می‌شود [34].

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 64.7\phi^{0.7476}\left(\frac{d_f}{d_s}\right)\left(\frac{k_s}{k_f}\right)^{0.7476} \times Pr^{0.9955}Re^{1.2321} \qquad (۱۱)$$

که در رابطهٔ (۱۱) اثر حرکت براونی و هم‌چنین اندازهٔ ذرات در تعیین مقدار ضریب هدایت حرارتی مورد توجه قرار می‌گیرد. این رابطه برای ذراتی با اندازه‌های ۱۱ تا ۱۵۰ نانومتر معتبر است. d_f قطر ذرات ملکولی سیال پایه و d_s قطر ذرات ملکولی نانوذرات جامد و k_s ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و k_f ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات می‌باشد.

برای محاسبهٔ عدد ناسلت موضعی از رابطهٔ زیر استفاده می‌کنیم [35].

$$Nu_x = \frac{q''_w}{k_{eff}\left(T_W - T_b\right)} \qquad (۱۲)$$

در رابطه فوق "q شار حرارتی دیواره و T_w دمای دیواره و T_b دمای بالک می‌باشد.

برای محاسبهٔ عدد ناسلت میانگین از رابطهٔ زیر استفاده می‌کنیم [35].

$$Nu_m = \frac{1}{L}\int_0^L Nu_x dx \qquad (۱۳)$$

شرایط مرزی هیدرو دینامیکی و حرارتی

با توجه به هندسهٔ میکرولوله، شرط عدم لغزش و عدم پرش دمایی ممکن است برای جریان در مقیاس میکرو مناسب نباشد. درواقع در رژیم‌های لغزش در همسایگی دیواره ناحیه‌ای وجود دارد که ملکول‌های سیال دارای نوسان هستند. این ناحیه لایهٔ نادسن نامیده می‌شود و ضخامت آن متناسب با فاصلهٔ پویش آزاد ملکولی است. در نادسن‌های کوچک اثرات لایهٔ نادسن قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد اما در رژیم‌های لغزشی اثرات لایه نادسن باید درنظر گرفته شود چرا که شرط مرزی لغزش بین سیال و مرز جامد می‌تواند تأثیر سطح و فعالیت ذرات ملکولی را بازتاب نماید. سرعت لغزشی و پرش دمایی در دیوارهٔ یک میکرولوله به‌وسیلهٔ فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند [36-39]. برای حل سرعت لغزشی β، u_s و F_m به‌ترتیب ضریب سرعت لغزشی و سرعت لغزشی و ضریب انطباق حرارتی می‌باشد.

$$u_s = -\frac{2-F_m}{F_m}\beta\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_{r=r_0} \qquad (۱۴)$$

ضریب انطباق حرارتی را برابر یک در نظر می‌گیریم و معادله را بی‌بعد می‌کنیم.

$$U_s = -\beta^*\left(\frac{\partial U}{\partial R}\right)_{R=R_0} \qquad (۱۵)$$

در رابطهٔ فوق *β ضریب سرعت لغزشی بی‌بعد می‌باشد که برابر با $\frac{\beta}{D}$ می‌باشد.

برای شرط مرزی حرارتی γ، T_s، T_w و F_t به‌ترتیب نسبت گرمای ویژه، پرش دمایی، دمای دیواره و ضریب انطباق حرارتی می‌باشد.

$$T_s - T_w = -\frac{2-F_t}{F_t}\frac{2\gamma}{\gamma+1}\frac{\beta}{Pr}\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=r_0} \tag{۱۶}$$

ضریب انطباق حرارتی و نسبت گرمایی ویژه را برابر یک در نظر می‌گیریم و معادله را بی‌بعد می‌کنیم.

$$\theta_s - \theta_w = -\frac{\beta^*}{Pr}\left(\frac{\partial \theta}{\partial R}\right)_{R=R_0} \tag{۱۷}$$

برای حل معادلات حاکم و گسسته‌سازی ناحیهٔ حل، از شبکهٔ سازمان‌یافته استفاده شده است برای گسسته‌سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است. برای ارتباط بین میدان سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل به‌کار برده شده است. طرح اختلاف بالادست مرتبهٔ دوم برای گسسته‌سازی عبارات نفوذ و جابه‌جایی معادلات حاکم، استفاده شده است. زمانی‌که مقادیر باقی‌ماندهٔ همهٔ پارامترها کمتر از 10^{-8} شود، حل مسئله همگرا می‌شود و محاسبات به نتیجه می‌رسد.

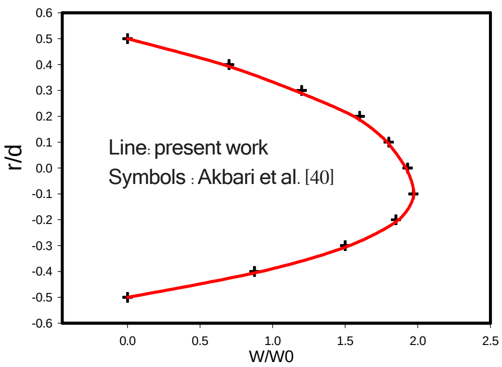
نتایج و بحث

استقلال نتایج از شبکه و اعتبارسنجی حل عددی. مقادیر سرعت بی‌بعد و دمای بی‌بعد در نقطهٔ (0.0025,0) در جدول (۳) در شبکه‌های مختلف 30×750، 40×1000 و 50×1250 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اختلاف بین شبکه‌های 40×1000 و 50×1250 کم می‌باشد. درنتیجه شبکهٔ 40×1000 برای محاسبات درنظر گرفته شده است.

جدول ۳ سرعت و دما در شبکه‌های مختلف برای $\phi=0.5\%$ و $Re=1$

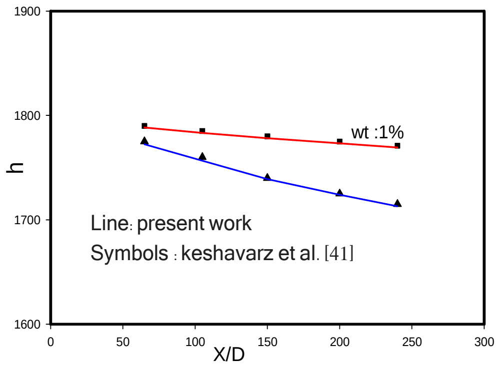
	30×750	40×1000	50×1250
U	1.6458	1.6464	1.6468
θ	0.8905	0.8906	0.8906

برای اعتبارسنجی مسئله، پروفیل‌های سرعت توسعه‌یافتهٔ نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم درون یک لوله برای مقادیر $Gr=5\times10^5$ و $\phi=2\%$، با نتایج اکبری و همکاران [40] در شکل (۲) مقایسه شده است. بیشترین اختلاف کار حاضر با مرجع [40] 8% می‌باشد.



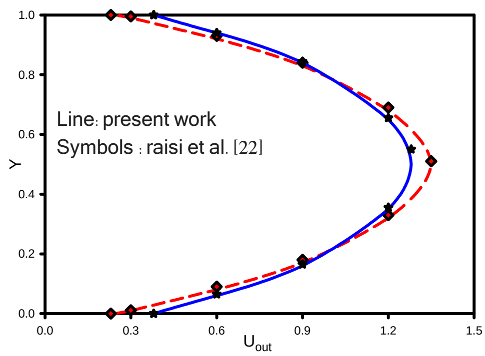
شکل ۲ اعتبارسنجی حل با مقایسهٔ پروفیل‌های سرعت توسعه‌یافته

هم‌چنین برای اعتبارسنجی مسئله ضریب انتقال حرارت متوسط نانوسیال غیرنیوتنی زانتان- اکسیدآلومینیوم در یک لوله برای کسر حجمی 4% و عدد رینولدز Re=1510 با نتایج کشاورز و همکاران [41] در شکل (۳) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد هم‌خوانی مناسبی بین کار حاضر و کار کشاورز و همکاران وجود دارد. بیشترین اختلاف کار حاضر با مرجع [41] 7% می‌باشد.



شکل ۳ اعتبارسنجی حل با مقایسهٔ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط برای مقادیر مختلف درصد وزنی محلول آبی زانتان در Re=1510

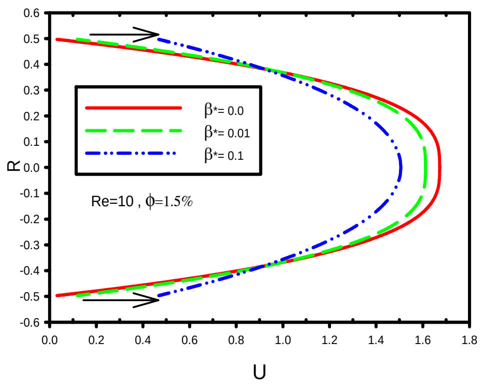
هم‌چنین پروفیل سرعت توسعه‌یافتهٔ نانوسیال آب-اکسید مس درون یک میکروکانال در رژیم لغزشی برای مقادیر مختلف ضریب لغزشی در Re=50 و φ =5% با نتایج رئیسی و همکاران در شکل (٤) مقایسه شده است. خطوط کار حاضر و نشانه‌ها مربوط به مقالهٔ رئیسی و همکاران می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد هم‌خوانی مناسبی بین کار حاضر و کار رئیسی و همکاران وجود دارد. بیشترین اختلاف کار حاضر با مرجع [22] 11% می‌باشد.



شکل ٤ اعتبارسنجی حل با مقایسهٔ پروفیل‌های سرعت توسعه‌یافته برای مقادیر مختلف ضریب لغزش

تأثیر ضریب لغزشی. در این تحقیق انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال غیرنیوتنی در یک میکرولولهٔ افقی مطالعه شده است. دیواره‌های میکرولوله همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، تحت دمای T_W قرار گرفته‌اند. نانوسیال غیرنیوتنی کربوکسی متیل سلولز اکسید آلومینیوم با دمای 298k و با سرعت ثابت (Ui) وارد میکرولوله می‌شود و پس از خنک‌سازی دیواره‌های میکرولوله از انتهای آن خارج می‌شود.

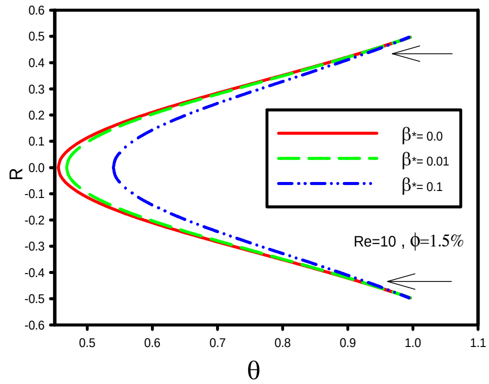
شکل (٥) تأثیرات مقادیر مختلف ضریب لغزش را بر پروفیل سرعت در امتداد خط عمودی وسط میکرولوله، نشان می‌دهد. به‌دلیل وجود رژیم لغزش، نانوسیال روی دیواره‌های میکرولوله دارای سرعت می‌باشد. لذا سرعت نانوسیال روی دیواره‌های میکرولوله دارای مقدار غیرصفر می‌باشد و هرچه ضریب لغزش افزایش می‌یابد، مقدار سرعت نانوسیال روی دیواره‌ها بیشتر می‌شود. مقدار ماکزیمم سرعت روی خط عمودی وسط میکرولوله نیز با افزایش ضریب لغزش به‌دلیل قانون بقای جرم کاهش می‌یابد. در این نمودار، جریان نانوسیال با پروفیل‌های سهمی شکل توسعه داده شده است و به‌دلیل وجود شرایط مرزی لغزش روی دیواره‌های میکرولوله، نانوسیال روی دیواره‌های میکرولوله دارای سرعت می‌باشد.



شکل ٥ تغییرات سرعت نانوسیال روی خط عمودی وسط میکرولوله (X=L/2)، برای مقادیر مختلف ضریب لغزش، در Re=10 ،φ=1.5%

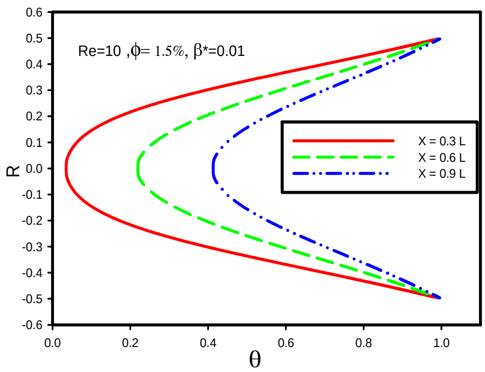
شکل (٦) تأثیرات مقادیر مختلف ضریب لغزش را بر پروفیل دما (θ) در طول خط عمودی وسط

میکرولوله نشان می‌دهد. به‌دلیل وجود پرش دمایی روی دیواره‌های میکرولوله، دمای نانوسیال روی دیواره‌های میکرولوله با دمای دیواره برابر نمی‌باشد. مقدار دما روی خط عمودی وسط میکرولوله نیز با افزایش ضریب لغزش افزایش می‌یابد.



شکل ٦ تغییرات دمای نانوسیال روی خط عمودی وسط میکرولوله (X=L/2)، برای مقادیر مختلف ضریب لغزش، در Re=10 ،ϕ=1.5%

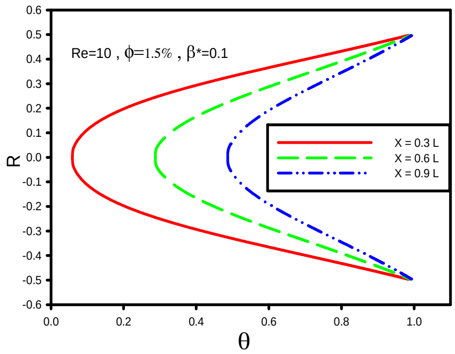
شکل (۷) تغییرات دمای نانوسیال را روی مقاطع مختلف میکرولوله در Re=10 ،ϕ=1.5% و β*=0.01 نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایشX، مقدار دمای بی‌بعد در خط مرکزی میکرولوله افزایش می‌یابد.



شکل ۷ تغییرات دمای نانوسیال روی مقاطع مختلف برای Re=10 ،ϕ=1.5% و β*=0.01

شکل (۸) تغییرات دمای نانوسیال روی مقاطع مختلف میکرولوله را برای Re=10،ϕ=1.5% و β*=0.1 نشان می‌دهد. با افزایش X، مقدار دمای بی‌بعد در خط مرکزی میکرولوله افزایش می‌یابد. پروفیل دما نشان می‌دهد دمای نانوسیال ورودی به میکرولوله به‌دلیل تبادل گرما با دیواره‌های میکرولوله که تحت دمای 308 k قرار دارد به‌صورت یکنواخت گرم شده‌اند و با افزایش X افزایش می‌یابد. این افزایش به‌دلیل انتقال حرارت از دیواره‌های میکرولوله به جریان نانوسیال در طول میکرولوله می‌باشد.

پروفیل دما نشان می‌دهد که دمای نانوسیال در نزدیکی دیواره‌های گرم افزایش می‌یابد.



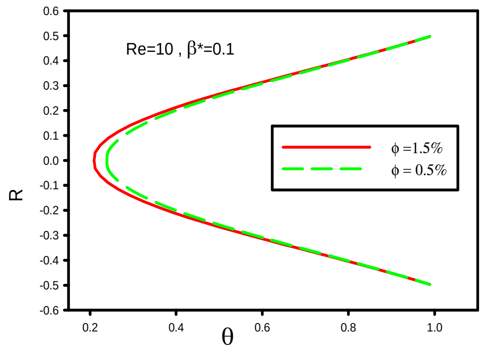
شکل ۸ تغییرات دمای نانوسیال روی مقاطع مختلف میکرولوله برای β*=0.1 ، ϕ=1.5% و Re=10

با مقایسهٔ شکل(۷) و شکل (۸) نیز مشخص می‌گردد که دمای بی‌بعد در یک مقطع مشخص با افزایش ضریب لغزش، افزایش می‌یابد.

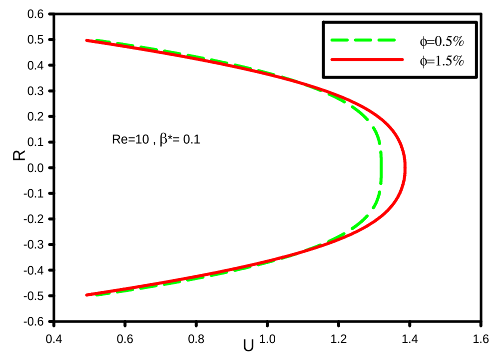
تأثیر کسر حجمی نانوسیال. شکل(۹) تأثیرات کسرحجمی نانوسیال را بر روی پروفیل دما در (X=L/2) در Re=10 و β*=0.1 در درصدهای حجمی مختلف نشان می‌دهد. با افزودن ذرات نانویی به سیال پایه، به‌دلیل بالا بودن قابلیت حرارتی این ذرات، نفوذ حرارت از دیواره بیشتر می‌شود. باتوجه به نمودار مشاهده می‌شود افزایش کسر حجمی نانوذرات جامد،

باعث افزایش دمای بدون بعد نانوسیال به‌دلیل افـزایش ضریب هدایت گرمایی نانوسیال می‌شود.

شکل (۱۰) تـأثیرات کسـرحجمی نانوسـیال را بـر روی پروفیل سرعت نشان می‌دهد. با توجه بـه نمـودار مشاهده می‌شود که با توجه به ثابت بودن عدد رینولدز با افـزایش کسـر حجمـی، سـرعت نانوسـیال افـزایش می‌یابد.



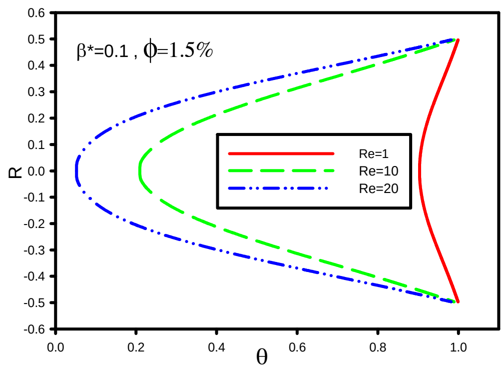
شکل ۹ تغییرات دمای نانوسیال روی خط عمودی وسط میکرولوله(X=L/2)، برای مقادیر مختلف کسرحجمی، در Re=10 ،$\beta^*=0.1$



شکل ۱۰ تغییرات سرعت نانوسیال روی خط عمودی میکرولوله برای مقادیر مختلف کسر حجمی در $\beta^*=0.1$ ،Re=10

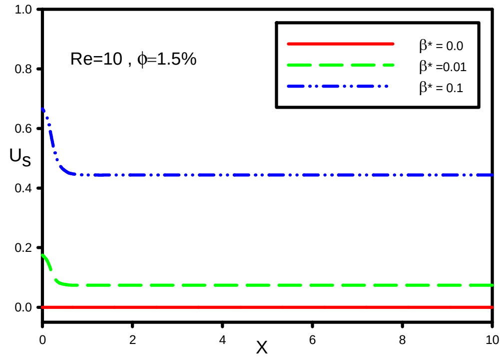
تأثیررینولدز، کسرحجمی و ضریب لغـزش. شـکل (۱۱) تأثیرات عدد رینولدز را بر روی پروفیـل دمـا در (X=L/2) در $\phi=1.5\%$ و $\beta^*=0.1$ نشـان مـی‌دهـد. بـا افزایش عدد رینولدز دمـای بـی‌بعـد بـه‌دلیـل افـزایش سـرعت ذرات نـانویی و کـاهش تبـادل انتقـال حرارت،کاهش می‌یابد.

در سرعت‌های بالا زمان کافی بـرای تبـادل انتقـال حرارت بین دیواره‌های میکرولولـه و نانوسـیال وجـود ندارد. در Re=1 به‌دلیل سرعت پایین ذرات تبادل گرما بیشتر است. با افـزایش عـدد رینولـدز، تغییـرات قابـل توجهی در پروفیل‌های دما مشاهده می‌شود. دلیـل ایـن رفتار سرعت نانوسیال و نرخ تبادل انتقال حرارت بـین نانوسیال و دیواره‌های میکرولوله می‌باشد.



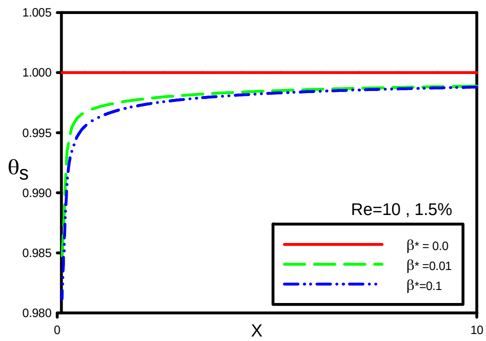
شکل ۱۱ تغییرات دمای نانوسیال روی خط عمودی میکرولوله (X=L/2) در $\phi=1.5\%$ ،$\beta^*=0.1$ برای مقادیر مختلف Re

شکل (۱۲) تأثیرات مقادیر مختلف ضریب لغـزش را بـــر روی ســـرعت لغزشـــی Us در (X=L/2) در $\phi=1.5\%$ و Re=10 نشان می‌دهـد. باتوجـه بـه نمـودار مشاهده می‌شود که سرعت لغزشـی دیـواره در ورودی میکرولوله مقـدار مـاکزیمم اسـت و در طـول کمـی از دیوارهٔ ورودی میکرولوله با افزایش x کاهش می‌یابـد و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد و کاملاً توسعه‌یافتهٔ هیـــدرودینامیکی مـــی‌شـــود. ضـــریب لغـــزش تـــأثیر قابل‌توجهی بر ســرعت لغزشــی نانوســیال در نزدیکــی دیواره‌های میکرولوله دارد. به‌گونـه‌ای کـه بـا افـزایش ضریب لغزش جریان به رژیم لغزشی نزدیکتر می‌شـود و ســرعت لغزشــی در طــول دیــواره‌هــای میکرولولــه افــزایش مــی‌یابــد. در $\beta^*=0.0$ ســرعت لغزشــی صــفر می‌باشد.



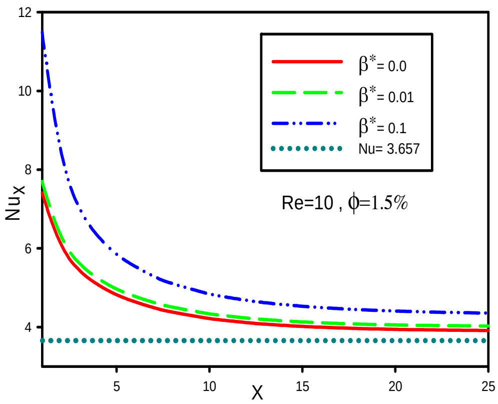
شکل ۱۲ تغییرات سرعت لغزشی نانوسیال در امتداد دیواره‌های میکرولوله در ϕ=1.5% ،Re=10 در کسرحجمی‌های مختلف

شکل (۱۳) تأثیرات مقادیر مختلف ضریب لغزش را بـر روی پـرش دمـایی در (X=L/2) در ϕ=1.5% و Re=10 نشان می‌دهـد. باتوجـه بـه نمـودار مشـاهده می‌شود که بـا افـزایش ضـریب لغـزش، پـرش دمـایی دیواره بیشتر می‌شود ولی به‌هرحال در طول میکرولولـه روند کاهشـی دارد. در β*=0.0 دمـای نانوسـیال روی دیواره، دمای دیواره است.



شکل ۱۳ تغییرات پرش دمایی نانوسیال در امتداد دیواره‌های میکرولوله در ϕ=1.5% ،Re=10 در کسرحجمی‌های مختلف

مقادیر عدد ناسلت نانوسیال روی دیوار میکرولوله برای مقادیر مختلف ضریب لغـزش سـرعت در شـکل (۱٤) ارائه شده اسـت. عـدد ناسـلت لولـه در شـرایط مرزی دما ثابت در جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته مقـدار Nu=3.657 محاسبه شـده اسـت. ایـن شـکل تـأثیرات مقادیر مختلف β* را بر عدد ناسلت موضـعی در طـول دیواره میکرولوله در Re=10 و ϕ=1.5% نشان می‌دهد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد افزایش ضـریب لغـزش موجـب افزایش عدد ناسلت می‌گردد زیـرا بـا افـزایش ضـریب لغزش، گرادیان دما در طول دیوار گرم‌شدهٔ میکرولولـه افزایش مـی‌یابـد. عـدد ناسـلت در ورودی میکرولولـه به‌دلیل بیشترین اختلاف دما بین نانوسیال و دیواره‌های میکرولوله دارای مقدار مـاکزیمم مـی‌باشـد و در طـول میکرو لوله با افزایش X به‌دلیل افزایش دمای نانوسیال، کـاهش مـی‌یابـد. در خروجـی میکرولولـه کـه دمـای نانوسیال و دمای دیوارهٔ میکرولوله بسیار به‌هم نزدیـک می‌شوند، مقدار عدد ناسلت بسیار کم می‌شود.

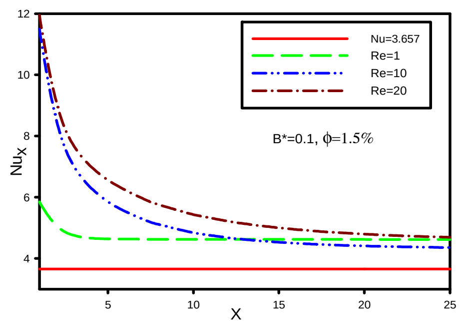


شکل ١٤ تغییرات عدد ناسلت موضعی برای مقادیر مختلف ضریب لغزشی در ϕ=1.5% ،Re=10

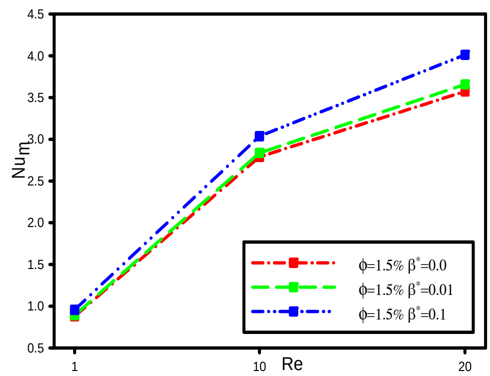
شکل (۱۵) تـأثیرات مقـادیر مختلـف عـدد Re را برعدد ناسلت موضعی در طـول دیـوارهٔ میکرولولـه در β*=0.1 و ϕ=1.5% نشـان مـی‌دهـد. نتیجـه‌هـا نشـان می‌دهد افـزایش عـدد رینولـدز موجـب افـزایش عـدد ناسلت مـی‌گـردد. زیـرا گرادیـان دمـا در طـول دیـوار گرم‌شـدهٔ میکرولولـه افـزایش مـی‌یابـد. در عـددهـای رینولدز پایین افـزایش عـدد ناسـلت کمتـر مـی‌باشـد. سرعت نانوسیال در نزدیکی دیواره‌های میکرولوله کـم می‌باشد و زمان کافی برای تبادل انتقـال حـرارت بـین نانوسیال و دیواره‌های میکرولوله وجـود دارد و دمـای

نانوسیال افزایش می‌یابد و به دمای دیواره‌های میکرولوله می‌رسد و اختلاف دمای نانوسیال و دیواره‌های میکرولوله کاهش می‌یابد. ماکزیمم عدد ناسلت روی دیواره‌های میکرولوله در Re=20 و β*=0.1 به‌دست می‌آید.

مقادیر عدد ناسلت میانگین نانوسیال روی دیوار میکرولوله برای مقادیر مختلف ضریب لغزش سرعت در شکل (١٦) ارائه شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ضریب لغزش عدد ناسلت افزایش می‌یابد.



شکل ١٥ تغییرات عدد ناسلت موضعی برای مقادیر مختلف عدد رینولدز در ϕ=1.5%, β*=0.1



شکل ١٦ تغییرات عدد ناسلت میانگین برای مقادیر مختلف β*

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال غیرنیوتنی محلول آبی CMC–اکسید آلومینیوم در یک رژیم لغزشی بررسی گردید. تأثیرات غلظت ذرات نانو، نیروی برشی، ضریب لغزش سرعت بر روی میدان جریان و نرخ انتقال حرارت بررسی گردید. سرعت لغزشی و پرش دمایی با افزایش ضریب لغزش، افزایش می‌یابد اما مقدار عدد ناسلت در خروجی میکرولوله کاهش می‌یابد. مقدار ماکزیمم عدد ناسلت در ورودی رخ می‌دهد و سپس طی یک روند کاهشی به‌طور مجانبی به‌سمت یک مقدار ثابت در راستای میکرولوله میل می‌کند. ضریب لغزش تأثیر قابل‌توجهی بر سرعت لغزشی و پرش دمایی نانوسیال در نزدیکی دیواره‌های میکرولوله دارد. به‌گونه‌ای‌که با افزایش ضریب لغزش، جریان به رژیم لغزشی نزدیکتر می‌شود و سرعت لغزشی و پرش دمایی در طول دیواره‌های میکرولوله افزایش می‌یابد.

فهرست علائم

- β^* ضریب لغزش سرعت بدون بعد، $\beta^*=\beta/h$
- C_p گرمای ویژه، J/kgK
- d قطر میکرولوله، m
- K ضریب هدایت حرارتی، W/mk
- l طول میکرولوله، m
- L طول بدون بعد میکرولوله، m
- Nu_x عدد نوسلت موضعی
- P فشار سیال، P_a
- Pr عدد پرانتل
- q'' شار حرارتی، W/m^2
- Re عدد رینولدز
- T دما، k
- u سرعت افقی، $s^{-1}m$
- U سرعت افقی بدون بعد، $U=u/u_i$
- u_s سرعت لغزشی، $s^{-1}m$

v	سرعت عمودی، $m s^{-1}$		**علائم یونانی**
V	سرعت عمودی بدون بعد، $V=v/u_c$	β	ضریب لغزش سرعت، $m s^{-1}$
x	مختصهٔ افقی، m	ϕ	کسرحجمی نانوذرات جامد
X	مختصهٔ افقی بدون بعد، $X=x/d$	η	لزجت دینامیکی، $p_a.s$
r	مختصهٔ عمودی، m	θ	دمای بدون بعد، $\theta = (T - T0)/(Tw - T0)$
R	مختصهٔ عمودی بدون بعد، $R=r/d$	ρ	دانسیته، kgm^{-3}

مراجع

1. Li, J. and Kleinstreuer, C., "Thermal performance of nanofluid flow in microchannels", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 1221-1232, (2008).
2. Pawan Singh, K., Harikrishna, P.V., Sundararajan, T. and Sarit Das, K., "Experimental and numerical investigation into the hydrodynamics of nanofluids in microchannels", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 42, pp. 174-186, (2012).
3. Jung, Ju., Oh, H. and Kwak, H., "Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 466-472, (2009).
4. Aminossadati, S.M., Raisi, A. and Ghasemi, B., "Effect of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 46, pp. 1373-1382, (2011).
5. Shariat, M., HosseinNezhad, A.A., Behzadmehr, A. and Laur, R., "Numerical study of two phase laminar mixed convection nanofluid in elliptic ducts", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 2348-2359, (2011)
6. Gad-el Hak, M., "Flow physics in MEMS", *Rev. Mec. Ind*., 2, 313-341, (2001).
7. Adams, T.M., Abdel-Khalik, S.I., Jeter, S.I. and Qureshi, Z.H., "An experimental investigation of single-phase forced convection in microchannel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 851-857, (1998).
8. Xuan, Y., Li, Q. and Ye, M., "Investigation of convection heat transfer in ferrofluidmicroflows using lattice-Boltzmann approach", *International Journal of Heat and Mass Transfer Thermal Sciences*, Vol. 46, pp. 105-111, (2007).
9. Ho, C. and Tia, Y., "Micro-electro-mechanical-system(MEMS) And fluid flows", *Annu. Rev. Fluid Mech*., Vol. 30, pp. 579-612, (1998).
10. Keshavarz, M., Hossein Haddad, S.M. and Darabi, M., "Modeling of Force Convection Heat Transfer of a Non-Newtonian Nanofluid in the Horizintal Tube Under Constant Heat Flux With Computational Fluid Dynamics", *Internatinal Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 995-999, (2012).
11. Choi, Z. and Zhang, Y., "Numerical simulation of laminar forced convection heat transfer Al2O3–water nanofluid in a pipe with return bend", Vol. 55, pp. 90-102, (2012).

12. Tahir, S. and Mital, M., "Numerical investigation of laminar nanofluid developing flow and heat transfer in a circular channel", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 39, pp. 8-14, (2012).
13. Akbarinia, A. and Laur, R., "Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach", *International Journal of Heat and Fluid flow*, Vol. 30, pp. 706-718, (2009).
14. Hojati, M., Etemad, S.GH., Bagheri, R. and Thibault, J., "Convection Heat Transfer of Non-Newtonian Nanofluid Through a Uniformly Circular Tube", *Experrimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, pp. 1351-1356, (2011).
15. Kumar P. and Ganesan, R., "A CFD Study of Turbulent Convection Heat Transfer Enhancement in Circular Pipeflow", *Internatinal Journal of Civil and Envirronmental Engineering*, Vol. 7, pp. 385-392, (2012).
16. Akbarinia, A., Abdolzadeh, M. and Laur, R., "Critical investigation of heat transfer enhancement using nanofluids in microchannels with slip and non-slip flow regimes", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 556-565, (2011).
17. ChidanandMangrulkar, K. and VilayatraiKriplani, M., "Nanofluid Heat Transfer-A Review", *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 3, pp. 136-142, (2013).
18. Santra, A., Sen, S. and Chakraborty, N., "Study of Heat Transfer Due to Lminar Flow of Copper-Water Nanofluid Through Two Isothermally Heated Parallel Plates", *Internatinal Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 391-400, (2009).
19. Barkhordari, M. and Etemad, S.GH., "Numerical Study of Slip Flow Heat Transfer of Non-Newtonian Fluids in Circular Microchanels", *Internatinal Journal of Heat nad Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 1027-1033, (2007).
20. Behzadmehr, A., Saffar-Avval, M. and Galanis, N., "Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach", *International Journal of Heat and Fluid Flow,* Vol. 28, pp. 211-219, (2007).
21. Ding, Y., Alias, H., Wen, D. and Williams, R., "Heat Transfer of Aqueous Suspension of Carbon Nanotube", *Internatinal Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 240-250, (2006).
22. Raisi, A., Ghasemi, B., S Aminossadati, M., "A Numerical Study on the Forced Convection of Laminar Nanofluid in a Microchannel with Both Slip and No-Slip Conditions", *International Journal of Computation and Methodology*, Vol. 59, pp. 114-129, (2012).
23. Rahman, M.M., Al-Lawatia, M.A., Eltayeb, I.A. and Al-Salti, N., "Hydromagnetic slip flow of water based nanofluids past a wedge with convective surface in the presence of heat generation or absorption", *Internatinal Journal of Nonlinear Mechanics*, Vol. 46, pp. 1373-1382, (2011).
24. Ahmed, M.A., Shuaib, N.H., Yusoff, M.Z. and Al-Falahi, A.H., "Numerical investigations of flow and heat transfer enhancement in a corrugated channel using nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1368-1375, (2011).
25. Jung, J., Oh, H. and Kwak, H., "Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 466-472, (2009).
26. Afshar, H., Shams, M., Nainian, S.M.M. and Ahmadi, G., "Microchannel heat transfer and dispersion of nanoparticles in slip flow regime with constant heat flux", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 1060-1066, (2009).

27. Kalteh, M. and Abbassi Saffar-Avval, A.,M.,J., "Eulerian-Eulerian two-phase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, pp. 107-116, (2011).
28. Niu, J., Fu, C. and Tan, W., "slip flow and heat transfer pf a Non-Newtonian nanofluid in a microtube", *Plos one*, Vol. 7, 99-106, (2012).
29. Hojati, M., Etemad, S.GH., Bagheri, R. and Thibault, J., "Rheological Characteristics of Non-Newtonian nanofluids: Experimental investigation", *Internatinal Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 144-148, (2011).
30. Shayam, R. and Chhabra, R.P., "Effect of Prandtl number on heat transfer from tamdem square cylinders immersed in power-law fluids in the low Reynolds number regime", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, pp. 742-755, (2013).
31. J Han, C., Zhang, Y.M., "High performance heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 513–523, (1992).
32. Kamali, R. and Binesh, A.R., "Numerical Investigation of Heat Transfer Enhancement Using Carbon Nanotube Non-Newtonian Nanofluids", *Internatinal Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1153-1157, (2010).
33. Brinkman, H.C., "The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution", J. *Chem. Phys*., Vol. 20, pp. 571–581, (1952).
34. Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P. and Choi, S.U.S., "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (AL2O3) thermal conductivity enhancement", *Appl. Phys. Lett*., Vol. 87, pp. 1-3, (2005).
35. Mirmasomi, S. and Behzadmehr, A., "Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 717-727, (2007).
36. Hadjiconstantinou, N.G. and Simek, O., "Constant-wall-temperature nusselt number in micro nano-channels", *Transactions of ASME*, Vol. 124, pp. 356-364, (2002).
37. Beskok, A. and Karniadakis, G.E., "Simulation of heat and momentum transfer in complex microgeometries", *J. Thermophys Heat Transfer*, Vol. 8, pp. 647-655, (1994).
38. Satapathy, A.K., "Slip flow heat transfer in an infinite microtube with axial conduction", Vol. 49, pp. 153-160, (2010).
39. Vandadi, V., Vandadi, A. and Aghanajafi., C., "Slip-Flow heat transfer circular microchannel with Viscous dissipation", *IJRRAS*, Vol. 6, pp. 176-181, (2011).
40. Akbari, M., Behzadmehr, A. and Shahraki, F., "Fully developed mixed convection in horizontal and inclined tubes with uniform heat flux using nanofluid", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 545-556, (2008).
41. Keshavarz, M., Hossein Haddad, S.M. and Darabi, M., "Modeling of Force Convection Heat Transfer of a Non-Newtonian Nanofluid in the Horizintal Tube Under Constant Heat Flux With Computational Fluid Dynamics", *Internatinal Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 995-999, (2012).